

## Uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para predição não-destrutiva de densidade básica da madeira de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus pellita*

Marcelo Lazzarotto<sup>1</sup>

Washington Luiz Esteves Magalhães<sup>2</sup>

Os programas de melhoramento florestal necessitam cada vez mais da avaliação da qualidade da madeira. Atualmente, a caracterização tecnológica depende do abate de árvores. Uma alternativa é a retirada de rolos de incremento de árvores em pé e a realização das caracterizações nestas pequenas amostras de madeira. Ainda assim, frequentemente os programas de melhoramento usam ferramentas genéticas que necessitam de um número grande de amostras, da ordem de 500 árvores (CAPP et al., 2013; GRATTAPAGLIA; RESENDE, 2011; ISIK et al 2011).

A densidade básica apresenta grande variabilidade, associada com moderada herdabilidade, sendo importante a seleção de árvores para o melhoramento florestal (MCKEAND et al., 2001). A densidade básica da madeira é a propriedade física que mais se correlaciona com a maioria das outras de interesse tecnológico (BARRICHELO; BRITO, 1979). Por exemplo, a densidade tem alta correlação com as propriedades mecânicas da madeira (CHAUHAN; AGGARWAL, 2011) e também com muitas características anatômicas (GONÇALVES et al., 2010; KIAEI, 2011). A

densidade básica da madeira é de simples medida em laboratório pelo método de Arquimedes.

A coleta a campo dos rolos de incremento é onerosa e trabalhosa. Além disso, a densidade medida nos rolos de incremento não representa a densidade do fuste. Além da madeira da árvore ser anisotrópica e de o formato do fuste ser aproximado a um tronco de cone, ainda há o fato de o volume de madeira próximo à casca ser muito maior que o volume de madeira próximo à medula. Assim, a densidade básica da madeira em um disco do tronco é melhor representada pela densidade de uma cunha deste disco. No entanto, uma bagueta traz o mesmo volume de madeira próxima à medula e próxima da casca. Desta forma, a densidade de um rolo de incremento acaba sendo uma média aritmética das densidades das madeiras próximas à medula e à casca. No entanto, existem propostas para usá-la, servindo para a comparação entre indivíduos para efeito de melhoramento genético. Adicionalmente, os tempos e os custos de coletas e análises são grandes empecilhos para o desenvolvimento de clones de eucalipto.

<sup>1</sup>Químico, Doutor, Pesquisador da Embrapa Florestas, [marcelo.lazzarotto@embrapa.br](mailto:marcelo.lazzarotto@embrapa.br)

<sup>2</sup>Engenheiro químico, Doutor, Pesquisador da Embrapa Florestas, [washington.magalhaes@embrapa.br](mailto:washington.magalhaes@embrapa.br)

Para contornar estas dificuldades, foi proposta a coleta de pequenos cavacos de madeira, coletados através de broca de aço rápido duro adaptada ao mesmo motor de combustão interna usado no conjunto moto-serra (Figura 1).



Foto: Paulo Eduardo Telles dos Santos

**Figura 1.** Coleta de amostras usando broca de aço rápido duro adaptada ao motor de combustão interna usado no conjunto moto-serra.

Assim, um único operador pode coletar amostras de madeira de 1.000 árvores de eucalipto, em cerca de uma semana de trabalho.

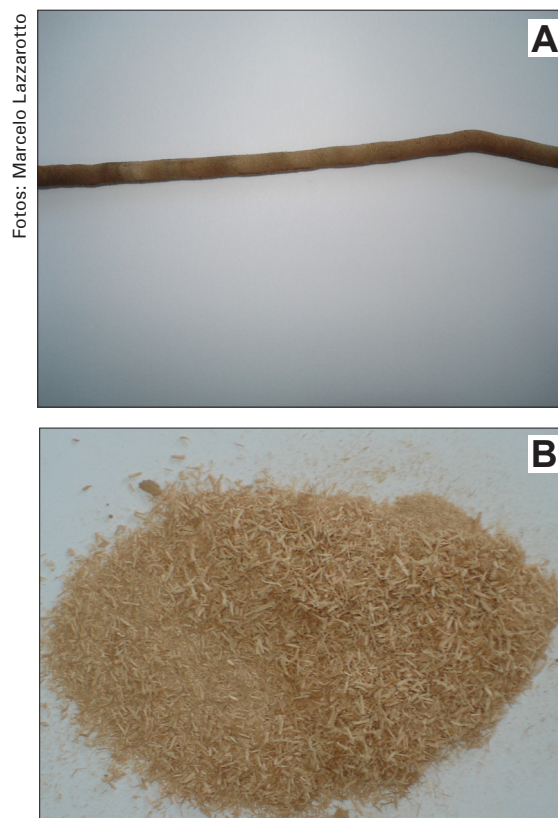
A partir dos pequenos cavacos, obtém-se por moagem em moinho de facas um pó apropriado para a coleta de espectros de infravermelho. A partir destes espectros, que são obtidos de forma rápida e não destrutiva, consegue-se construir curvas de calibração para predição de diversas propriedades que podem ser úteis, não apenas aos programas de melhoramento, mas também para a indústria de base florestal de um modo geral (MAGALHÃES et al., 2006).

Atualmente, existe muito interesse no desenvolvimento de métodos rápidos e não-destrutivos para a determinação de propriedades de madeira oriunda de árvores plantadas e de rápido crescimento. Essas propriedades são importantes para a indústria em termos de avaliação de seus recursos e também para ajudar nos trabalhos de melhoramento genético dos seus plantios (INAGAKI et al., 2012; SO et al., 2004).

Este trabalho tem por objetivo avaliar a técnica de análise por reflectância difusa de infravermelho próximo (NIR) na determinação da densidade básica em pó das madeiras de *E. pellita* e *E. benthamii*, em um mesmo modelo.

### Amostragem e preparação do material

Foram utilizadas amostras de madeira de 40 árvores de *E. benthamii* e 44 de *E. pellita*, totalizando 84 indivíduos. De cada uma delas foram coletados rolos de incremento (Figura 2) usando sonda Pressler, e cavacos pequenos usando broca rápida de aço duro. Os orifícios de coleta foram feitos à altura do peito (DAP) e um acima do outro. A secagem do cavaco pequeno de madeira foi realizada ao ar durante uma semana. Os cavacos da broca foram moídos (Figura 2), usando-se o moinho de facas tipo Wiley. Após passar em uma peneira de 0,5 mm, foram usados para a obtenção dos espectros na região do infravermelho próximo.



Fotos: Marcelo Lazzarotto

**Figura 2.** Amostras utilizadas: (A) rolo de incremento; (B) serragem obtida após o moinho de facas.

### Medida convencional da densidade básica da madeira

Os rolos de incremento foram colocados em água durante uma semana, para saturação total das amostras. Foi determinado o peso imerso das amostras saturadas com o auxílio de um dispositivo especial acoplado ao prato da balança. A seguir, foi realizada a pesagem das amostras, após a remoção da água superficial em excesso, obtendo-se o peso

saturado. Depois, foi realizada a secagem das amostras em estufa regulada em  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  até peso constante, para a obtenção do peso seco. A densidade básica foi calculada utilizando-se a relação:

$$\rho_b = \text{PS} / (\text{PSAT} - \text{PI})$$

Onde:

$$\rho_b = \text{densidade básica (g cm}^{-3}\text{)}$$

$$\text{PS} = \text{peso seco (g)}$$

$$\text{PSAT} = \text{peso saturado (g)}$$

$$\text{PI} = \text{peso imerso (g)}$$

A balança usada tem precisão de 0,001 g, portanto, o erro da medida convencional da densidade é de no máximo  $1\text{ kg m}^{-3}$ .

### NIR

Os espectros na região do NIR foram obtidos usando o equipamento Bruker Tensor 37. Os espectros foram coletados com uma resolução de  $2\text{ cm}^{-1}$  entre os números de onda de 4.000 a  $10.000\text{ cm}^{-1}$ , no modo de reflectância difusa.

### Construção do modelo de calibração

O modelo matemático utilizado foi o de mínimos quadrados parciais (PLS), usando o programa *Unscrambler* (CAMO AS, Norway) versão 10.2. Os valores de densidade básica utilizados para a predição foram os obtidos no item 2.2 de madeiras de *E. benthamii* e *E. pellita* em um mesmo modelo. Foram testados diversos tratamentos e combinações entre eles nos espectros obtidos

(Alisamentos, Normalização, Primeira e Segunda Derivadas, *Multiple Scatter Correction* (MSC) e *Standard Normal Variate* (SNV)), mas o melhor modelo foi obtido usando os tratamentos SNV e Segunda Derivada (usando o método de transformação *Savitzky-Golay* com polinomial de segunda ordem e 10 pontos de cada lado).

O grupo de dados foi dividido em duas partes, 2/3 foi usado para calibração (construção do modelo) e o 1/3 restante para a validação externa (predição). A seleção das amostras para o subgrupo de calibração foi construído com a organização em ordem ascendente das densidades básicas experimentais e selecionadas uniformemente distribuídas em subgrupos. O subgrupo de validação foi construído usando as amostras complementares. Este procedimento permite alto controle da variabilidade em cada subgrupo.

Na Figura 3 são apresentados os valores de referência medidos em laboratório de forma convencional para a densidade básica versus os valores calculados com base nos espectros de NIR obtidos da madeira. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) encontrado para a calibração foi superior a 0,78 e o erro de validação cruzada foi cerca de  $21\text{ kg m}^{-3}$  para uma densidade média de  $467\text{ kg m}^{-3}$ .

O erro padrão de predição encontrado foi de  $27\text{ kg m}^{-3}$ , com um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,62, sendo utilizado 28 amostras nessa predição. Valores semelhantes foram encontrados por Via et al. (2005) para a predição de densidade de madeira.

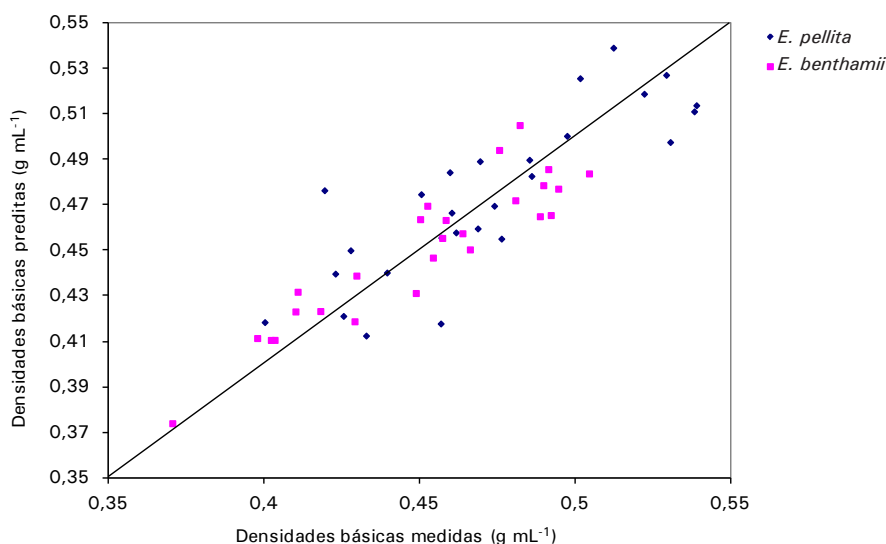


Figura 3. Valores de densidade medida pelo método convencional e predito através do infravermelho próximo (NIR).

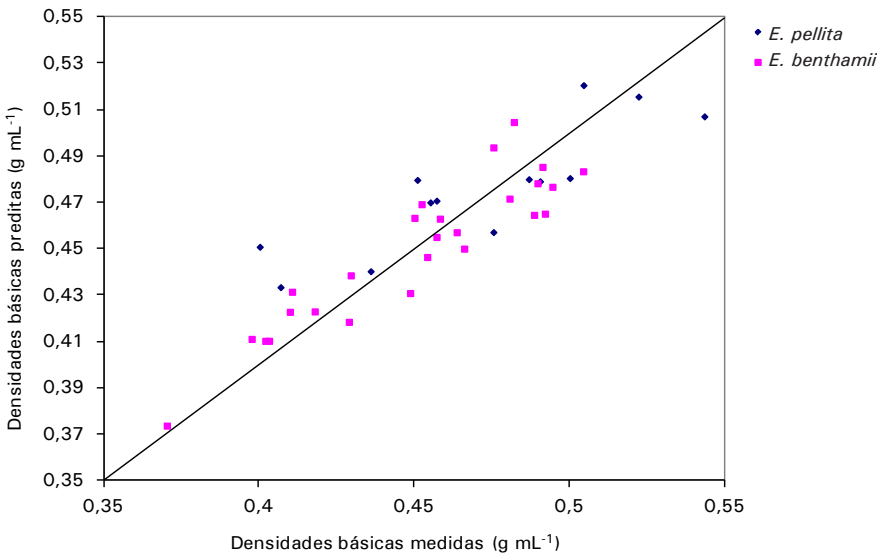
Na Figura 4 são apresentados os valores da densidade básica medida convencionalmente versus os valores preditos pela técnica NIR para a validação externa do modelo construído.

Os espectros de NIR têm maior correlação com os teores de lignina da madeira (MAGALHÃES et al., 2003) do que com a densidade básica. Todavia, mesmo para o caso da densidade básica, a correlação ainda é alta e justifica a utilização desta metodologia.

A avaliação do bom ajuste da curva de predição pode ser inferido, dentre outros parâmetros, pela razão de performance (RDP=SD/SE, Tabela 1), que é a razão entre o desvio padrão da amostra na análise convencional e o erro de predição, fornecido pelo método quimiométrico. Esta razão avalia se a técnica pode distinguir entre as amostras. Ou seja, altos valores da razão SD/SE significa que o erro de estimativa da densidade é muito menor

que o desvio padrão das amostras. Ao contrário, baixos valores indicam a ineficiência do modelo. Segundo Schimleck et al. (2004), razões SD/SE em torno de 1,5 já são úteis para uma primeira separação e podem ser empregadas em programas de melhoramento. O ideal são valores acima de 2 para o RPD.

Como a técnica usa valores convencionais para obtenção da curva de calibração, o erro de predição não poderia ser menor que o erro da medida tradicional. Comparando o erro de predição com o erro da medida convencional, e considerando o tempo de análise que diminui de alguns dias para cerca de 15 seg, a técnica pode ser usada para controle de qualidade e na seleção preliminar em programas de melhoramento genético para a indústria de base florestal. O desvio da razão de performance (RDP) para este caso está por volta de 1,67, corroborando a afirmação anterior.



**Figura 4.** Valores de densidade medida pelo método convencional e predito através do infravermelho próximo (NIR) usando amostras externas àquelas usadas na calibração.

**Tabela 1.** Resultados das análises estatísticas para os grupos de calibração e predição para as densidades básicas de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus pellita*.

Parâmetros	Grupo de calibração	Validação cruzada	Grupo de predição externa
Mínimo	0,371	0,371	0,371
Máximo	0,573	0,573	0,573
Média	0,467	0,467	0,467
SD	0,045	0,045	0,045
R²	0,834	0,788	0,622
RMSE	0,018	0,021	0,026
SE	0,018	0,021	0,027
SD/SE	2,500	2,143	1,667

SD = desvio padrão; R² = coeficiente de determinação; RMSE = erro quadrático; SE = erro padrão.

Para a construção de um modelo de predição, é necessário que o conjunto amostral contemple uma variação de valores de densidade muito ampla. Este modelo pode ser utilizado para a predição da densidade básica nestas espécies, simultaneamente. Em geral, estes modelos são muito apropriados para a interpolação e não são indicados para a extrapolação, ou seja, para amostras fora da faixa de calibração da curva.

### Conclusão

Modelos de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS), usando os tratamentos SNV e Segunda Derivada, podem ser usados para desenvolver boas correlações ( $R^2 > 0,8$  para a calibração) entre os espectros de NIR e a densidade básica da madeira.

O  $R^2$  e o erro de predição podem ser considerados satisfatórios se forem consideradas a variabilidade natural da madeira e o pequeno tempo despendido (< 15 s) para realização de uma análise. Essa rapidez viabiliza o emprego do método nos programas de melhoramento.

É possível prever a densidade tanto para madeiras de *E. benthamii* como de *E. pellita* a partir da curva construída neste trabalho.

### Referências

- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. Variabilidade radial da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 18, p. 81-102, 1979.
- CAPPA, E. P.; EL-KASSABY, Y. A.; GARCIA, M. N.; ACUNA, C.; BORRALHO, N. M. G.; GRATAPAGLIA, D.; POLTRI, S. N. M. Impacts of population structure and analytical models in genome-wide association studies of complex traits in forest trees: a case study in *Eucalyptus globulus*. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 8, n. 11, e81267, 2013.
- CHAUHAN, S. S.; AGGARWAL, P. Segregation of *Eucalyptus tereticornis* Sm. clones for properties relevant to solid wood products. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 68, n. 3, p. 511-21, 2011.
- GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. da S.; SILVA, G. F. da; NAPPO, M. E.; TOMAZELO FILHO, M. Parâmetros dendrométricos e correlações com propriedades tecnológicas em um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 5, p. 947-59, 2010.
- GRATTAPAGLIA, D.; RESENDE M. D. V. Genomic selection in forest tree breeding. **Tree Genetics & Genomes**, Heidelberg, v. 7, p. 241-255, 2011.
- INAGAKI, T.; SCHWANNINGER, M.; KATO, R.; KURATA, Y.; THANAPASE, W.; PUTHSON, P.; TSUCHIKAWA, S. *Eucalyptus camaldulensis* density and fiber length estimated by near-infrared spectroscopy. **Wood Science and Technology**, New York, v. 46, n. 1-3, p. 143-55, 2012.
- ISIK, F.; MORA, C. R.; SCHIMLECK, L. R. Genetic variation in *Pinus taeda* wood properties predicted using non-destructive techniques. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 68, p. 283-93, 2011.
- KIAEI, M. Anatomical, physical, and mechanical properties of eldar pine (*Pinus eldarica* Medw.) grown in the Kelardasht region. **Turkish Journal of Agriculture & Forestry**, Turkey, v. 35, n. 1, p. 31-42, 2011.
- MAGALHÃES, W. L. E.; PEREIRA, J. C. D.; BOLZON DE MUÑIZ, G. I.; KLOCK, U.; SILVA, J. R. M. da. Determinação de propriedades de madeira através do infravermelho próximo. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 8., 2003, São Paulo. **Benefícios, produtos e serviços da floresta: oportunidades e desafios do século XXI**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura: Sociedade Brasileira de Engenheiros Florestais, 2003. CD-ROM.
- MAGALHÃES, W. L. E.; ZANGISKI, F.; KLEIN, C. H.; HIGA, A. R. **Uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para predição não-destrutiva de densidade básica da madeira de Pinus taeda**. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. 4 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 159).
- McKEAND, S. T.; ALLEN, H. L.; GOLDFARB, B. **Tree improvement and intensive silviculture: productivity increases from modern plantation methods**. Raleigh: North Carolina State University, 2001.



SCHIMLECK, L. R.; JONES, P. D.; PETER, G. F.; DANIELS, R. F.; CLARK, A. Nondestructive estimation of tracheid length from sections of radial wood strips by near infrared spectroscopy. **Holzforschung**, Berlin, v. 58, p. 375-81, 2004.

SO, C-L.; VIA, B. K.; GROOM, L. H.; SCHIMLECK, L. R.; SHUPE, T. F.; KELLEY, S. S.; RIALS, T. G. Near infrared spectroscopy in the forest products industry. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, p. 6-16, 2004.

VIA, B. K.; SO, C-L.; SHUPE, T. F.; STINE, M.; GROOM, L. H. Ability of NIRS to monitor air-dry density distribution and variation of wood. **Wood and Fiber Science**, Lawrence, v. 37, n. 3, p. 394-402, 2005.

**Comunicado  
Técnico, 334**

Embrapa Florestas

Endereço: Estrada da Ribeira Km 111, CP 319  
Colombo, PR, CEP 83411-000

Fone / Fax: + 55 41 3675-5600

<https://www.embrapa.br/fale-conosco/sac/>

1ª edição

Versão eletrônica (2014)



**Comitê de  
Publicações**

Presidente: *Patrícia Póvoa de Mattos*

Secretária-Executiva: *Elisabete Marques Oaida*

Membros: *Alvaro Figueredo dos Santos, Claudia Maria Branco de Freitas Maia, Elenice Fritzsons, Guilherme Schnell e Schuhli, Jorge Ribaski, Luis Claudio Maranhão Froufe, Maria Izabel Radomski, Susete do Rocio Chiarello Penteado*

**Expediente**

Supervisão editorial: *Patrícia Póvoa de Mattos*

Revisão de texto: *Patrícia Póvoa de Mattos*

Normalização bibliográfica: *Francisca Rasche*

Editoração eletrônica: *Rafaele Crisostomo Pereira*